



Year: 2016

¿Cuál es el futuro del caudal en las cuencas glaciadas de los Andes Centrales?

Kronenberg, Marlene ; Schauwecker, Simone ; Huggel, Christian ; Salzmann, Nadine ; Drenkhan, Fabian ; Giráldez, Claudia ; Gurgiser, Wolfgang ; Kaser, Georg ; Suarez, Wilson ; García Hernández, Javier ; Rohrer, Mario

Abstract: In Peru several hydropower companies produce energy in glaciated catchments located in the Cordilleras Blanca (Santa river), Vilcanota (Vilcanota-Urubamba river) and Central (Cañete river). In this context, our study investigates the glacier atmosphere and climate change interactions considering furthermore a scenario of significant precipitation reductions in the region until the end of the XXI century. Finally, the objective of our study is to estimate the consequences of the glacial retreat on the available water resources for the downstream users in the glaciated catchments. We use the model ITGG-2.0 for analysing the glacier sensitivity to changes in climatic conditions. Our results indicate that a precipitation decrease will not only affect the accumulation rate of glaciers but also has consequences on the available energy for ablation. Therefore, the glacier retreat in the Central Andes is expected to accelerate, making water availability unsustainable and leading to future shortages for water users as well as natural systems. = En el Perú, varias empresas hidroeléctricas están generando energía en cuencas glaciadas situadas sobre todo en las Cordilleras Blanca (río Santa), Vilcanota (río Vilcanota-Urubamba) y Central (río Cañete). En este contexto, nuestro estudio investiga las interacciones entre los glaciares, el clima y el cambio climático; incluyendo un análisis de un escenario plausible de fuerte reducción de la precipitación a finales del siglo XXI. El objetivo final es determinar las consecuencias del retroceso glaciar causado por el cambio climático en la disponibilidad futura de recursos hídricos de las cuencas glaciadas. Se utiliza el modelo ITGG-2.0 para analizar la sensibilidad de los glaciares con respecto a condiciones climáticas cambiantes. Los resultados indican que una disminución de las precipitaciones en el futuro tiene como consecuencia no solamente cambios en la acumulación de nieve de los glaciares, sino también en la cantidad de energía disponible para el proceso de ablación. Esto significa que el retroceso glaciar posiblemente se acelerará en las cuencas de los Andes Centrales liberando agua de una manera no sostenible, lo cual producirá futuros déficits de agua para los usuarios y los sistemas naturales.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-130578>

Conference or Workshop Item

Published Version

Originally published at:

Kronenberg, Marlene; Schauwecker, Simone; Huggel, Christian; Salzmann, Nadine; Drenkhan, Fabian; Giráldez, Claudia; Gurgiser, Wolfgang; Kaser, Georg; Suarez, Wilson; García Hernández, Javier; Rohrer, Mario (2016). ¿Cuál es el futuro del caudal en las cuencas glaciadas de los Andes Centrales? In: XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima (Peru), 28 September 2016 - 30 September 2016. s.n., 1364-1373.

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016**

**¿CUÁL ES EL FUTURO DEL CAUDAL EN LAS CUENCAS GLACIADAS
DE LOS ANDES CENTRALES?**

***Marlene Kronenberg 1,2, Simone Schauwecker 1,3, Christian Huggel 3, Nadine Salzmann 2,3,
Fabian Drenkhan 3,4, Claudia Giráldez 3, Wolfgang Gurgiser 5, Georg Kaser 6, Wilson Suarez
7, Javier García Hernández 8 y Mario Rohrer 1***

1 Meteodat GmbH, Technoparkstrasse 1 8005 Zurich, Suiza, kronenberg@meteodat.ch

2 Department of Geosciences, University of Fribourg, Suiza

3 Department of Geography, University of Zurich, Suiza

4 Departamento de Ciencias, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

5 Research Focus Alpine Space - Man and Environment, University of Innsbruck, Austria

6 Institute for Atmospheric and Cryospheric Sciences, University of Innsbruck, Austria

7 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima, Perú

8 Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), Sion, Suiza

RESUMEN:

En el Perú, varias empresas hidroeléctricas están generando energía en cuencas glaciadas situadas sobre todo en las Cordilleras Blanca (río Santa), Vilcanota (río Vilcanota-Urubamba) y Central (río Cañete). En este contexto, nuestro estudio investiga las interacciones entre los glaciares, el clima y el cambio climático; incluyendo un análisis de un escenario plausible de fuerte reducción de la precipitación a finales del siglo XXI. El objetivo final es determinar las consecuencias del retroceso glaciar causado por el cambio climático en la disponibilidad futura de recursos hídricos de las cuencas glaciadas. Se utiliza el modelo ITGG-2.0 para analizar la sensibilidad de los glaciares con respecto a condiciones climáticas cambiantes. Los resultados indican que una disminución de las precipitaciones en el futuro tiene como consecuencia no solamente cambios en la acumulación de nieve de los glaciares, sino también en la cantidad de energía disponible para el proceso de ablación. Esto significa que el retroceso glaciar posiblemente se acelerará en las cuencas de los Andes Centrales liberando agua de una manera no sostenible, lo cual producirá futuros déficits de agua para los usuarios y los sistemas naturales.

ABSTRACT:

In Peru several hydropower companies produce energy in glaciated catchments located in the Cordilleras Blanca (Santa river), Vilcanota (Vilcanota-Urubamba river) and Central (Cañete river). In this context, our study investigates the glacier atmosphere and climate change interactions considering furthermore a scenario of significant precipitation reductions in the region until the end of the XXI century. Finally, the objective of our study is to estimate the consequences of the glacial retreat on the available water resources for the downstream users in the glaciated catchments. We use the model ITGG-2.0 for analysing the glacier sensitivity to changes in climatic conditions. Our results indicate that a precipitation decrease will not only affect the accumulation rate of glaciers but also has consequences on the available energy for ablation. Therefore, the glacier retreat in the Central Andes is expected to accelerate, making water availability unsustainable and leading to future shortages for water users as well as natural systems.

PALABRAS CLAVES: glaciares, cambio climático, recursos hídricos, Andes Centrales

INTRODUCCIÓN

En el Perú, los glaciares desempeñan un papel fundamental en la disponibilidad de recursos hídricos para el sector hidráulico y otros usuarios (Baraer et al., 2012; Drenkhan et al., 2015). Los caudales pueden ser regulados en las centrales hidroeléctricas durante periodos de estiaje gracias al aporte de los glaciares.

Un glaciar es un almacén natural de agua. Durante durante precipitaciones de nieve el glaciar acumula masa y la pierde por los procesos de ablación (i.e. procesos de sublimación y fusión del deshielo). El agua de deshielo glaciar proporciona agua al sistema hídrico. Un glaciar en equilibrio acumula y pierde la misma cantidad de agua en el transcurso de un año hidrológico. Sin embargo, en las últimas décadas, los glaciares del Perú han perdido volúmenes importantes (p. ej. Kaser et al., 2003). El retroceso de los glaciares en el mundo está relacionado con el incremento de la temperatura global (Marzeion et al., 2014). Se han discutido diversas razones que explicarían el importante deshielo de los glaciares peruanos. Algunos ejemplos son la reducción de la precipitación, el aumento de la humedad específica, o su estado desequilibrado (p. ej. Vuille et al., 2008; Salzmann et al., 2013; Schauwecker et al., 2014).

Para el futuro, están proyectados importantes cambios en las condiciones climáticas de los Andes Peruanos (Bradley et al., 2006; Neukom et al., 2015). Mientras los modelos climáticos indican un unívoco aumento de la temperatura, hay importantes incertidumbres con respecto a la precipitación futura. En un estudio reciente Neukom et al. (2015) muestran que las precipitaciones futuras sobre los Andes Centrales podrían decrecer de 19-33%.

Es ampliamente conocido que los glaciares reflejan el clima y son excelentes indicadores del cambio climático (Oerlemans, 1994; Haeberli et al., 2007). El volumen glaciar y sus cambios resultan de los procesos de acumulación y ablación, los cuales dependen de la disponibilidad de energía. La energía de ablación en la superficie de un glaciar consiste en el calor latente de la sublimación L_S y del deshielo L_M ; y de la sublimación S y del deshielo M . El total de $L_S S$ y $L_M M$ se puede calcular con:

$$SW_{in}(1 - \alpha) + LW_{in} + LW_{out} + H + C = L_S S + L_M M \quad [1]$$

Donde SW_{in} representa la radiación de onda corta incidente y α el albedo; LW_{in} y LW_{out} representan la radiación de onda larga proveniente de la atmosfera y la emitida por la superficie, respectivamente; H es el flujo de calor sensible; C es el flujo de calor en la nieve o en el hielo. Todos los términos en la ecuación 1 están relacionados de una manera u otra con la temperatura del aire y la humedad de la atmósfera. Además, estas dos variables climáticas determinan también la acumulación del glaciar.

Para los Andes Centrales existen relativamente pocos estudios que investiguen las relaciones entre el clima y los glaciares (cf. Fernandez and Mark, 2016). Ninguno de estos estudios incluye las consecuencias de una disminución de la precipitación para los glaciares. En el presente estudio investigamos las consecuencias de determinados escenarios seleccionados para el balance de energía y de masa de los glaciares del Perú, con enfoque en la Cordillera Vilcanota.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

La zona de estudio del presente trabajo es la Cordillera Vilcanota, localizada al sur del Perú (Figura 1). Dicha Cordillera es la segunda cordillera glaciada más grande del país, con una superficie glaciar de 279.4 km² en 2009 (ANA-UGRH, 2014) y un rango altitudinal entre 4700 y 6300 m s.n.m. En la Cordillera Vilcanota se encuentra el campo de hielo Quelccaya, el único ubicado en los trópicos. En el centro de la cordillera se ubica la Laguna Sibinacocha, de origen glaciar y utilizada para la producción hidroeléctrica de la planta Machu Picchu I/II (190 MW) y Santa Teresa I (98 MW) río abajo. Los glaciares de la Cordillera Vilcanota drenan hacia varias direcciones - hacia el norte y noroeste en los ríos Paucartambo, Vilcanota y Urubamba; hacia el noreste en los ríos Corani, San Gabán; y hacia el sureste en el Lago Titicaca. El río Vilcanota tiene

una alta importancia socio-económica y sus aguas se utilizan entre otras para la producción hidroeléctrica, la agricultura y el consumo privado.

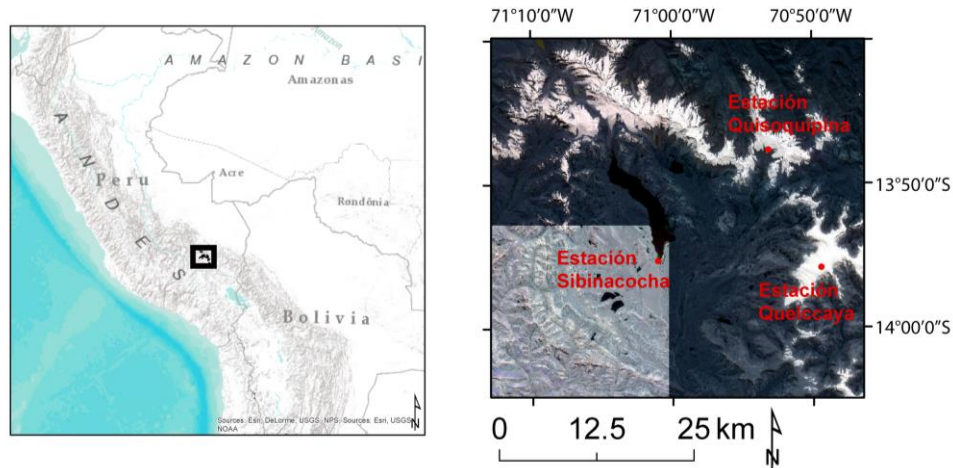


Figura 1.- Izquierda: Localización de la Cordillera Vilcanota en Perú. Derecha: Imagen de satélite de la Cordillera Vilcanota. Las estaciones de Sibinacocha y Quisoquipina y el campo de hielo de Quisoquipina están indicados.

Para el presente estudio utilizamos principalmente datos medidos en tres estaciones (Fig. 1) en un periodo entre octubre 2011 y septiembre 2013. Los años seleccionados son de precipitaciones medias. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) mantiene una estación meteorológica automática en el glaciar Quisoquipina en la Cordillera Vilcanota (13.8°S, 70.9°O, 5192 m s.n.m., Figura 1), donado por el proyecto PRAA del Banco Mundial en el año 2010 y apoyado por los proyectos PACC y Glaciares de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, COSUDE. Para este estudio, utilizamos las medidas de temperatura del aire, albedo y radiación en onda corta y larga incidente y reflejada/emitada. Además, utilizamos datos de precipitación medidos en la estación Sibinacocha de la Empresa de Generación eléctrica Machupicchu S.A., Perú (EGEMSA) (13.9°S, 71.0°O, 4870 m s.n.m., Figura 1) y datos de radiación en onda larga y corta neta de la estación Quelccaya del UMass Climate System Research Center (13.9°S, 70.8°O, 5680 m s.n.m., Figura 1).

Los escenarios futuros se basan en datos de los modelos de circulación global (MCG) del CMIP5 (“Coupled Model Intercomparison Project”), escenario de concentración de gases de efecto invernadero RCP 8.5 (“Representative Concentration Pathways 8.5”) y de los resultados presentado por *Neukom et al.*, (2015). Este estudio supone escenarios de reducción de precipitación entre 19 y 33% durante los meses de diciembre, enero y febrero, causados por cambios en la circulación atmosférica y, por consiguiente, una reducción de los vientos provenientes del este que aportan humedad desde las tierras bajas de la cuenca del Amazonas. *Neukom et al.* (2015) han estudiado estos vientos en los MCG (CMIP5) y los han comparado con datos del pasado.

METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza el modelo ITGG-2.0 (*Juen et al.*, 2007) que es un modelo de balance de masa glaciar con una resolución temporal mensual. El balance de masa se calcula por la combinación de la variación altitudinal del balance de masa específico y del balance de masa específico del nivel de referencia (Ecuación 2) según *Kaser (2001)*.

$$b_{zr} = c_{zr} - \tau F(f)[SW_{in}(1 - \alpha)|_{zr} + \varepsilon_{\alpha}\sigma T_a^4|_{zr} - \sigma T_s^4|_{zr} + C_s(T_a|_{zr} - T_s|_{zr})] \quad [2]$$

Donde zr es el nivel de referencia; b_{zr} el balance de masa y c_{zr} la acumulación a este nivel; τ es el número de días por mes y $F(f)$ es la función que determina las contribuciones respectivas de la sublimación y del deshielo; SW_{in} representa la radiación en onda corta incidente y α el albedo. ε_{α} es un parámetro de la emisividad atmosférica que cambia en función de la humedad de la atmosfera;

σ es la constante de Stefan-Boltzmann; T_a la temperatura del aire; T_s la temperatura de la superficie glaciar y C_s es un coeficiente de transferencia de calor. La ecuación 3 describe la función $F(f)$.

$$F(f) = \frac{1-f}{L_M} + \frac{f}{L_S} \quad [3]$$

con

$$f = \frac{Q_S}{Q_M + Q_S} \quad \text{donde } 0 \leq f \leq 1 \quad [4]$$

f describe la proporción (ratio) de energía consumido por los procesos de sublimación Q_s y de deshielo Q_M . L_M y L_S son los calores latentes de la fusión y la sublimación de agua.

Para una descripción detallada del perfil de la variación altitudinal del balance de masa, véase Kaser (2001). En resumen, el perfil altitudinal se calcula por gradientes de flujos de energía. La acumulación a cualquier elevación z depende de la variación de la precipitación $\partial c/\partial z = \partial P/\partial z$. La ablación a cualquier elevación depende del total de energía disponible de cada flujo de energía (flujos de (i) energía sensible, (ii) de la radiación onda larga y (iii) de la radiación onda corta). El ratio entre sublimación y deshielo (f) queda constante en todas las elevaciones.

- (i) La variación del flujo de energía sensible $C_s[\partial(T_a - T_s)/\partial z]$ puede simplificarse para condiciones de deshielo tomando $T_s = 0^\circ\text{C}$ a $C_s\partial T_a/\partial z$. La variación es 0 cuando la temperatura del aire es menor de 0°C , porque bajo dichas condiciones se asume que $\partial T_s/\partial z = \partial T_a/\partial z$.
- (ii) Para condiciones de deshielo la variación del flujo de la radiación de onda larga se simplifica a la variación de la radiación en onda larga únicamente incidente. Se utiliza una fórmula lineal de la ecuación de Stefan-Boltzmann $4\varepsilon_a\sigma(273.15)^3\partial T_a/\partial z = C_R\partial T_a/\partial z$. Cuando la superficie está congelada, el perfil vertical de LW_{in} se compensa por el perfil vertical de LW_{out} porque $T_s/\partial z = \partial T_a/\partial z$.
- (iii) El perfil de la variación del flujo de radiación en onda corta únicamente depende del albedo α . Se espera que la línea de nieve aumente de manera regular durante el periodo de deshielo que progresa de la lengua hacia su elevación máxima que corresponde con la elevación de la línea de equilibrio. El promedio anual del gradiente de albedo se aproxima con $\frac{\partial \alpha}{\partial z} = \frac{\alpha_{snow} - \alpha_{ice}}{\frac{dz}{dt}\tau_{melt}}$ por debajo de la elevación de la línea de equilibrio; y $\frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0$ por encima de dicha línea.

Por encima del nivel de referencia z_r , la variación de la ablación se queda constante $\partial a = 0 \text{ kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$. El concepto de $\partial T_s = \partial T_a$ por encima del nivel de 0°C causa que los gradientes del flujo del calor sensible y de radiación en onda larga sean nulos. El albedo es constante por encima de la elevación de la línea de equilibrio. El nivel de referencia z_r se localiza allí donde la temperatura del aire mensual es 0°C ; y la elevación de la línea de equilibrio es extrapolada utilizando un cálculo preliminar del balance de masa.

Los datos necesarios para utilizar el modelo ITGG-2.0 son la temperatura del aire y al menos una variable de humedad, que en este caso es la precipitación. También se necesita el gradiente de temperatura $\partial T_a/\partial z$, el gradiente de la precipitación $\partial P/\partial z$ y el gradiente del albedo $\partial \alpha/\partial z$. La sublimación, la radiación en onda larga, el albedo y la radiación en onda corta incidente pueden ser determinados por la precipitación, porque se asume que el máximo y el mínimo de estas variables ocurren simultáneamente. Se utilizan relaciones lineares entre la precipitación y cada uno de los siguientes parámetros: el ratio f , la emisividad atmosférica ε_a , el albedo α y la radiación en onda corta incidente SW_{in} . Los límites de cada una de las interpolaciones lineares han sido calibrados.

El modelo ITGG-2.0 puede extenderse al modelo ITGG-2.0-R que incluye un cálculo del caudal glaciar de deshielo y la escorrentía de la parte no glaciar de la cuenca. Para este estudio nos enfocamos en una aplicación del modelo ITGG-2.0 para la estimación de las sensibilidades del

balance energético del nivel de referencia de los glaciares de la Cordillera Vilcanota con respecto a condiciones cambiantes en el futuro.

RESULTADOS

Precipitación y Albedo

Recientes investigaciones sobre la relación entre las medidas de precipitación mensual y los promedios mensuales del albedo indican que el albedo no solamente depende de la precipitación del presente mes, sino que también depende de la precipitación de los meses anteriores. En la Figura 2 puede verse que las curvas de precipitación y albedo aumentan simultáneamente y que la curva de albedo disminuye con un offset.

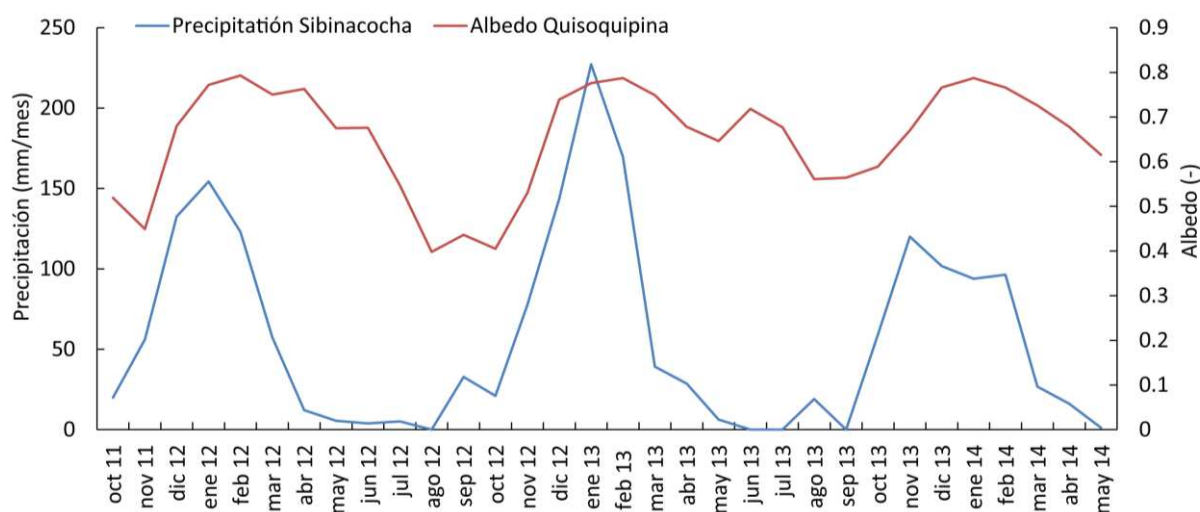


Figura 2.- Precipitación mensual medida en la estación de Sibinacocha y promedios mensuales del albedo medido en la estación de Quisoquipina en el periodo de noviembre 2011 hasta mayo 2014.

Tabla 1.- Correlaciones entre la precipitación mensual (Sibinacocha, suma por 1, 2, 3 y 4 meses) y el promedio mensual del albedo (Quisoquipina).

Precipitación suma	1 mes	2 meses	3 meses	4 meses
Albedo promedio mensual por	1 mes	1 mes	1 mes	1 mes
	R ²	R ²	R ²	R ²
2012	0.28	0.45	0.60	0.75
2013	0.38	0.58	0.64	0.56

Un resumen de las correlaciones entre la precipitación y el promedio mensual de los años 2012 y 2013 se encuentra en la Tabla 1. El R^2 es menor para la regresión lineal entre el albedo y la precipitación de un mes. Cuando incluimos la precipitación del mes o los meses anteriores el R^2 aumenta. Para 2013 el R^2 es máximo cuando se utiliza la suma de la precipitación de un periodo de tres meses. En consecuencia, sumamos la precipitación del mes de interés y de los dos meses anteriores para calcular el albedo del respectivo mes.

El modelo ITGG-2.0 necesita el límite máximo y mínimo del albedo y de la precipitación para calcular la relación lineal entre las dos variables. Utilizamos márgenes constantes para condiciones presentes y futuras. La Figura 3 muestra la consecuencia de la reducción de la precipitación entre 19 y 33% en los meses de diciembre, enero y febrero (como sugerido por *Neukom et al., 2015*) en el albedo y la energía disponible para la ablación, suponiendo las mismas márgenes para la relación lineal. Mientras el albedo se reduce entre 0.5 y 1, la energía de ablación aumenta entre 7 y 15 Wm^{-2} durante el verano.

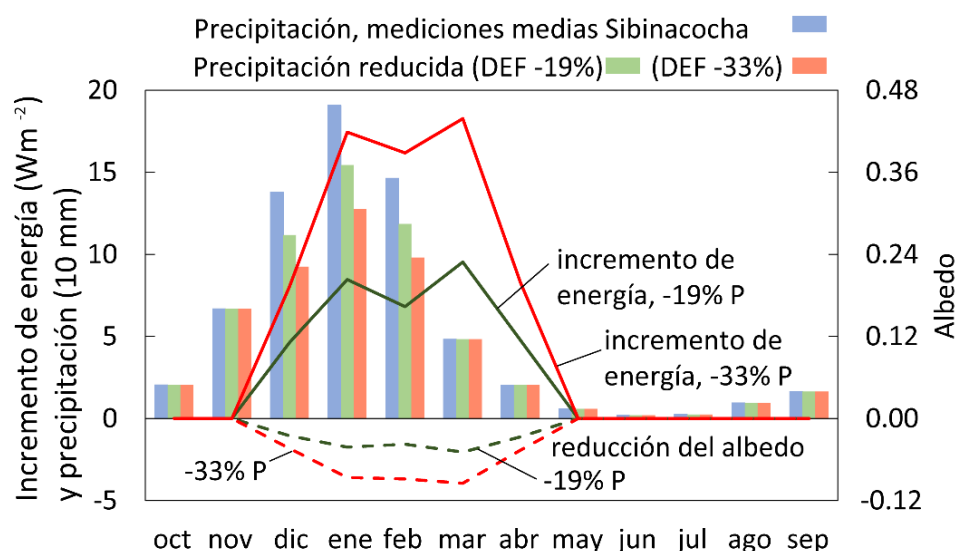


Figura 3.- Precipitación mensual (barras), cambio de energía (líneas) y del albedo (líneas discontinuas). Medidas medias de precipitación, estación Sibinacocha (barras azules), precipitaciones reducidas 19% y 33% en diciembre, enero y febrero en barras verdes y rojas respectivamente. Líneas verdes (rojas) indican el cambio de energía con una reducción de precipitaciones en diciembre, enero y febrero de 19% (33%) en comparación con condiciones presentes. Líneas discontinuas indican los cambios del albedo por los mismos escenarios.

Radiación en onda corta incidente

El estudio de *Neukom et al. (2015)* concluye condiciones más secas en los Andes Centrales. Adoptamos su resultado para estudiar los MCG CMIP5. Unas condiciones más secas conllevan menor presencia de nubes y como consecuencia un incremento de la radiación incidente en onda corta durante el verano. Por eso, es más probable que las condiciones futuras estén caracterizadas por condiciones con más radiación que las previstas en el promedio de todos los modelos CMIP5. Por lo tanto, hemos adaptado el cuantil de 90% de todos los escenarios como escenario más realista (Figura 4). En la Cordillera Vilcanota la radiación en onda corta incidente podría incrementar un 20% durante los meses de diciembre, enero y febrero hasta finales del siglo XXI.

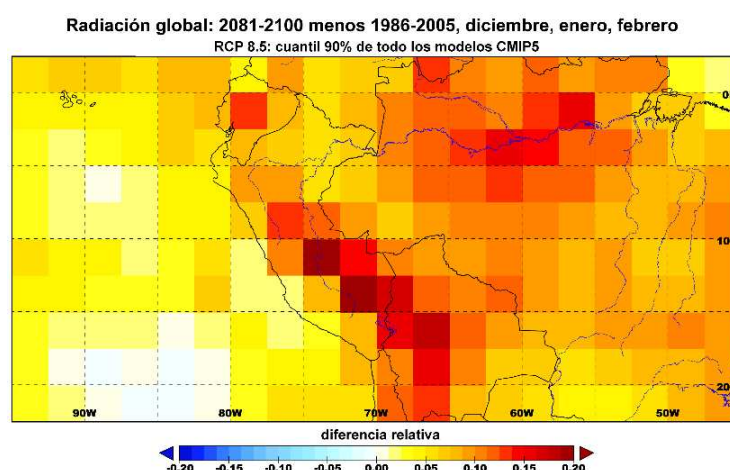


Figura 4.- Cambio de la radiación en onda corta incidente relativa al fin del siglo XXI (2081-2100) en comparación con el periodo 1986-2005. El mapa representa un escenario seco (90 % cuantil de todos los modelos CMIP5, escenario RCP 8.5).

Radiación onda larga

En la Figura 5 se pueden ver los cambios medios de la radiación incidente de onda larga hasta el fin del siglo XXI de todos los modelos CMIP5, RCP8.5. El incremento es máximo en la época seca y mínimo durante la estación húmeda. El promedio anual del cambio es 23 W m^{-2} , el promedio en los meses centrales de la estación húmeda (diciembre-febrero) es 21 W m^{-2} y el promedio de los meses centrales de la estación seca (junio-agosto) es 26 W m^{-2} . En la Figura 6 se muestran los cambios en la radiación incidente de onda larga utilizando el modelo ITGG-2.0 para los escenarios de reducción de precipitación de 19 y 33%. Los cambios son corregidos con el promedio de la estación seca de todos los modelos CMIP5. El escenario con una reducción de 33% de las precipitaciones en diciembre-febrero indica que la radiación incidente de onda larga aumentará a valores por encima de las condiciones presentes, aunque la cobertura de nubes será reducida.

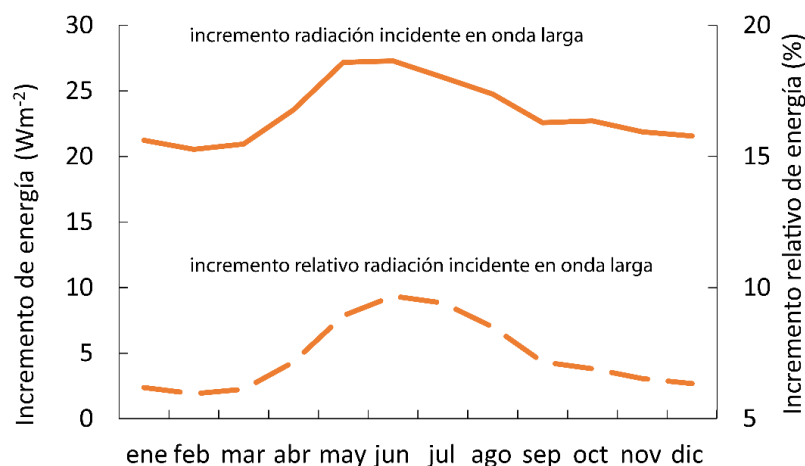


Figura 5.- Cambio de la radiación en onda larga incidente mensual absoluta (línea) y relativa (línea discontinua) al fin del siglo XXI (2071-2100) en comparación con el periodo 1986-2005 en la Cordillera Vilcanota. Las líneas se refieren al promedio de todos los modelos CMIP5, escenario RCP 8.5 (promedio de celdas de cuadrícula $12.5\text{--}15^\circ\text{S}$ y $70\text{--}72.5^\circ\text{O}$).

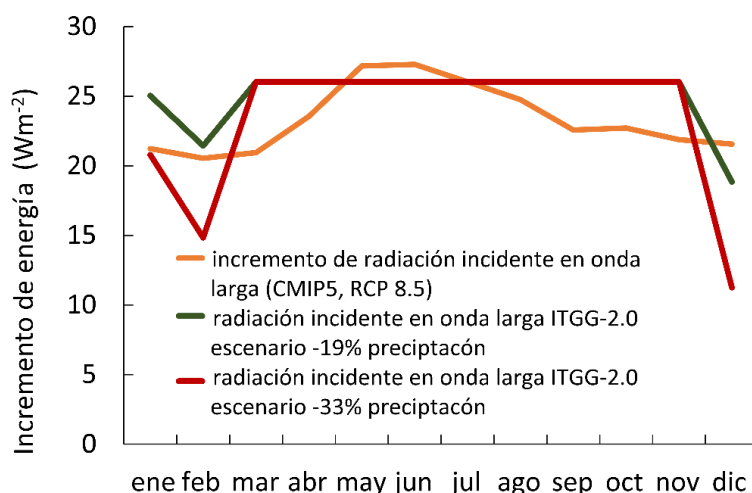


Figura 6.- Cambio de la radiación mensual de onda larga incidente para el escenario de precipitaciones reducidas en 19% (33%) línea verde (línea roja) en diciembre, enero y febrero, corregido con el cambio del periodo seco (junio, julio, agosto) medio de todos los modelos CMIP5, RCP8.5 para el presente nivel de la isoterma 0°C en la Cordillera Vilcanota. La línea naranja se refiere al cambio medio en radiación incidente en onda larga de todos los modelos CMIP5, escenario RCP 8.5.

Balance de energía

La Figura 7 muestra la suma de energía disponible para la ablación al nivel de la isoterma 0°C para las condiciones presentes (línea negra), y para dos escenarios futuros con radiaciones incidentes de onda corta y de onda larga aumentados, y con reducción de precipitación (líneas verde y roja). Los escenarios se basan en los resultados de las Figura 3, 4 y 5. El incremento de energía más destacado ocurre en la época húmeda.

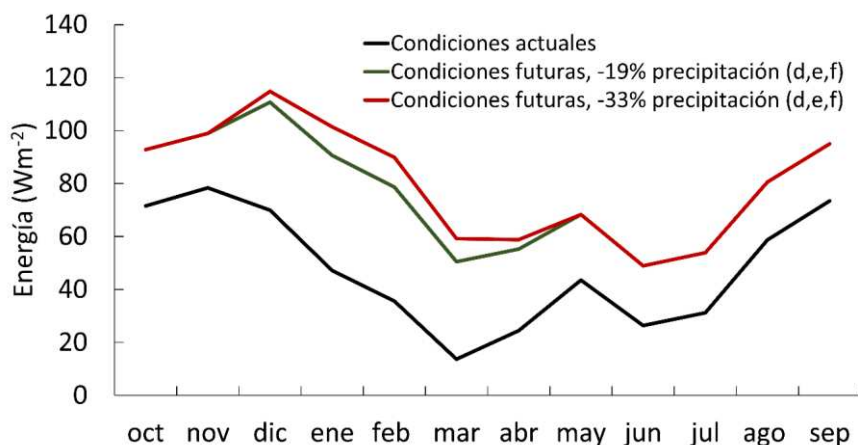


Figura 7.- Cambio en la energía disponible para la ablación al nivel de 0°C en la Cordillera Vilcanota para condiciones actuales (2011-2013, línea negra) y para dos escenarios futuros al fin del siglo XXI con radiación incidente en onda larga respectivamente corta aumentada y con precipitaciones de diciembre, enero y febrero reducidas de 19% (línea verde) y de 33% (línea roja).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Juen *et al.* (2007) utilizan la precipitación mensual para calcular el albedo. Nuestros resultados para la Cordillera Vilcanota indican que la correlación aumenta cuando incluimos la precipitación de los meses anteriores. Según nuestro análisis, una reducción de la precipitación puede causar importantes reducciones del albedo, resultando también en un aumento de energía disponible para la ablación. En nuestro análisis toda la precipitación ha sido considerada como nieve. Sin embargo, es una simplificación importante ya que también hay presencia de precipitaciones líquidas como las encontradas en la estación de Murmurani a 5050 m s.n.m. (Poremba *et al.* 2015), y el nivel de congelación es crítico para el albedo (Schauwecker *et al.*, 2016). Mientras la absorción de la radiación incidente en onda corta aumentará con la reducción del albedo, la cantidad de esta misma aumentará en un escenario más seco.

La comparación entre la radiación incidente de onda larga de todos los modelos CMIP5 (promedio) y del modelizado con ITGG-2.0 indican que una reducción en la cobertura de nubes no compensará el aumento de dicha radiación causada por los gases de efecto invernadero. El aumento de la radiación incidente de onda larga puede ser crítico para el balance de masa en el futuro. Trabajos realizados por Sicart *et al.* (2011) en el glaciar Zongo en Bolivia indican que actualmente, en el invierno austral, la pérdida de masa es reducida por la radiación neta en onda larga que es significativamente negativa.

Nuestros resultados para el presente nivel de la isoterma 0°C indican que la energía disponible para los procesos de ablación va a aumentar anualmente, con un aumento máximo en la época húmeda. (Figura 7). Esto significa que una reducción de la precipitación no solo afectará a los glaciares en términos de la acumulación, sino que también podrá causar un incremento de la ablación. Como consecuencia, la escorrentía glacial podría aumentar por un tiempo limitado y compensar las reducciones de la precipitación. Este aumento continuaría hasta la llegada del pico máximo de caudal (“peak water”), momento a partir del cual decrecería de forma continua. No

obstante, cuando los glaciares se hayan retirado en mayor parte, las consecuencias podrán ser observadas en la estacionalidad, un aumento de la variabilidad y reducciones importantes en la disponibilidad total de agua, especialmente en la estación seca. Estudios previos de escorrentía glacial no han incluido un escenario de precipitación reducida en los Andes Centrales, por lo cual los resultados anteriores solamente mencionan cambios en las escorrentías estacionales (p. ej. *Juen et al.*, 2007; *Andres et al.*, 2014).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Nuestros primeros resultados indican que la reducción de la precipitación puede causar un aumento de la disponibilidad de energía para el deshielo de los glaciares. Como consecuencia del incremento de energía, el retroceso glaciar puede acelerarse. El aumento del deshielo podría compensar en cierta medida la reducción de precipitaciones durante un tiempo limitado; pero el retroceso y desaparición de los glaciares conlleva a la desaparición del “almacén de agua” y el balance hídrico estacional y anual se vería afectado, con importantes consecuencias socio-económicas para el país.

Siguen existiendo numerosas incertidumbres con respecto a la futura disponibilidad de agua. En el presente estudio presentamos los resultados de un escenario seleccionado. Es importante estudiar todos los posibles escenarios e incluir otros efectos del cambio climático como el posible aumento de la línea de nieve que afectaría la acumulación y la ablación de los glaciares. Además, se tendría que estudiar de mayor forma el papel de las nuevas lagunas desarrollando a veces debido al retroceso glaciar también en términos de reservorios de recursos hídricos. La escasez de datos del pasado hace difícil conocer los procesos para las condiciones presentes y por consiguiente resulta difícil hacer proyecciones para el futuro. Sin embargo, el modelo ITGG-2.0 permite cálculos con datos de entrada limitados.

El próximo paso de nuestro trabajo es el análisis de otros escenarios. Finalmente presentaremos una amplia gama de resultados posibles para el balance de energía y de masa en relación al con el deshielo y la contribución glaciar futura en las cuencas de los Andes Centrales del Perú. Además, este estudio se completará utilizando el programa de modelamiento hidrológico semi-distribuido RS MINERVE para estudiar la operatividad hidráulica para futuras condiciones modificadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en contexto del Proyecto Glaciares+ financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) y en colaboración con CARE Perú. Los autores agradecen a Irmgard Juen, Universidad de Innsbruck, Austria, por su soporte con el modelo ITTG-2.0; al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y a la Empresa de Generación eléctrica Machupicchu S.A., Perú (EGEMSA) por su cooperación. La Unidad de Glaciares y Recursos Hídricos (UGRH), Perú ha digitalizado las áreas de los glaciares. Los datos de la estación Quelccaya se han descargado de <http://quelccaya.blogspot.ch/>.

BIBLIOGRAFÍA

- ANA-UGRH. (2014). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Huaraz.
- Andres, N., Vegas Galdos, F., Lavado Casimiro, W., and Zappa, M. (2014). "Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes". *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, No. 11, pp. 2043–2058.
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C, and Rathay, S. (2012). "Glacier recession and water resources in Peru' s Cordillera Blanca". *Journal of Glaciology*, Vol. 58, No. 207, pp. 134–150.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., and Vergara, W. (2006). "Threats to Water Supplies in the Tropical Andes". *Science*, Vol. 312, pp. 1755-1756.

- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., and Oré, M. T.** (2015). "The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru". *WIREs Water*, Vol. 2, 715–733.
- Fernandez, A., and Mark, B. G.** (2016). "Modeling modern glacier response to climate changes along the Andes Cordillera: A multiscale review". *Journal of Advances in Modelling Earth Sciences*, Vol. 8, pp. 1–29.
- Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., and Zemp, M.** (2007). "Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps". *Annals of Glaciology*, Vol. 46, pp. 150–160.
- Juen, I., Kaser, G., and Georges, C.** (2007). "Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú)". *Global and Planetary Change*, Vol. 59, pp. 37–48.
- Kaser, G.** (2001). "Glacier-climate interaction at low latitudes". *Journal of Glaciology*, Vol. 47, No. 157, pp. 195–204.
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gómez, J., and Tamayo, W.** (2003). "The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Perú". *Journal of Hydrology*, Vol. 282, pp. 130–144.
- Marzeion, B., Cogley, J. G., Richter, K., and Parkes, D.** (2014). "Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes". *Science*, Vol. 345, No. 6199, pp. 919–921.
- Neukom, R., Rohrer, M., Calanca, P., Salzmann, N., Huggel, C., Acuña, D., Christie, D. A., and Morales, M. S.** (2015). "Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000–2100". *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 8, pp. 084017.
- Oerlemans, J.** (1994). "Quantifying global warming from the retreat of glaciers". *Science*, Vol. 264, pp. 243–245.
- Poremba, R. J., Perry, L. B., Seimon, A., Martin, D. T., and Tupayachi, A.** (2015). "Meteorological Characteristics of Heavy Snowfall Events in the Cordillera Vilcanota , Peru". *ESC Eastern Snow Conference*, Sherbrooke, Quebec, Canada.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., and Portocarrero, C.** (2013). "Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes". *The Cryosphere*, Vol. 7, pp. 103–118.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., and Vuille, M.** (2014). "Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited". *Global and Planetary Change*, Vol. 119, pp. 85–97.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Salzmann, N., Montoya, N., Endries, J., and Perry, B.** (2016). "Snow and glaciers in the tropics: the importance of snowfall level and snow line altitude in the Peruvian Cordilleras". *EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-13160.
- Sicart, J. E., Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., and Ramirez, E.** (2011). "Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 116, D13105.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., and Bradley, R. S.** (2008). "Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future". *Earth-Science Reviews*, Vol. 89, No. 3-4, pp. 79–96.